



REC'D 04 MAR 2005

WIPO

PCT

BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITÉ - CERTIFICAT D'ADDITION

COPIE OFFICIELLE

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielle déposée à l'Institut.

Fait à Paris, le 2-3 DEC. 2004

Pour le Directeur général de l'Institut
national de la propriété industrielle
Le Chef du Département des brevets

Martine PLANCHE

DOCUMENT DE PRIORITÉ

PRÉSENTÉ OU TRANSMIS
CONFORMÉMENT À LA
RÈGLE 17.1.a) OU b)

BEST AVAILABLE COPY

INSTITUT
NATIONAL DE
LA PROPRIÉTÉ
INDUSTRIELLE

SIEGE
26 bis, rue de Saint-Petersbourg
75800 PARIS cedex 08
Téléphone : 33 (0)1 53 04 53 04
Télécopie : 33 (0)1 53 04 45 23
www.inpi.fr

INSTITUT NATIONAL DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

CRÉÉ PAR LA LOI N° 544 DU 10 AOÛT 1951



26 bis, rue de Saint Pétersbourg
75800 Paris Cedex 08
Téléphone : 33 (1) 53 04 53 04 Télécopie : 33 (1) 42 94 86 54

BREVET D'INVENTION CERTIFICAT D'UTILITÉ

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI

ceifa
N° 11354*03

REQUÊTE EN DÉLIVRANCE page 1/2

BR1

Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 540 e W / 210502

REMISE DES PIÈCES DATE 19 DEC 2003 LIEU 69 INPI LYON N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI DATE DE DÉPÔT ATTRIBUÉE PAR L'INPI 19 DEC. 2003 Vos références pour ce dossier (facultatif) BFF 03L0031		<input checked="" type="checkbox"/> NOM ET ADRESSE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE À QUI LA CORRESPONDANCE DOIT ÊTRE ADRESSÉE CABINET LAVOIX 62, rue de Bonnel 69448 LYON CEDEX 03	
Confirmation d'un dépôt par télécopie		<input type="checkbox"/> N° attribué par l'INPI à la télécopie	
2 NATURE DE LA DEMANDE		Cochez l'une des 4 cases suivantes	
Demande de brevet		<input checked="" type="checkbox"/>	
Demande de certificat d'utilité		<input type="checkbox"/>	
Demande divisionnaire		<input type="checkbox"/>	
Demande de brevet initiale		N° _____ Date _____	
ou demande de certificat d'utilité initiale		N° _____ Date _____	
Transformation d'une demande de brevet européen		<input type="checkbox"/>	
Demande de brevet initiale		N° _____ Date _____	
3 TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum) PROCEDE ET DISPOSITIF DE COMMANDE DES DEPLACEMENTS D'UNE PARTIE MOBILE D'UN ROBOT MULTI-AXES			
4 DÉCLARATION DE PRIORITÉ OU REQUÊTE DU BÉNÉFICE DE LA DATE DE DÉPÔT D'UNE DEMANDE ANTÉRIEURE FRANÇAISE		Pays ou organisation _____ N° _____ Date _____ Pays ou organisation _____ N° _____ Date _____ Pays ou organisation _____ N° _____ <input type="checkbox"/> S'il y a d'autres priorités, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»	
5 DEMANDEUR (Cochez l'une des 2 cases)		<input checked="" type="checkbox"/> Personne morale <input type="checkbox"/> Personne physique	
Nom ou dénomination sociale		STAUBLI FAVERGES	
Prénoms			
Forme juridique		SOCIETE EN COMMANDITE PAR ACTIONS	
N° SIREN		3 2 5 7 2 0 7 2 0	
Code APE-NAF			
Domicile ou siège	Rue	Place Robert Staubli	
	Code postal et ville	7 4 2 1 0 FAVERGES	
	Pays	FRANCE	
Nationalité		FRANCAISE	
N° de téléphone (facultatif)		N° de télécopie (facultatif)	
Adresse électronique (facultatif)			
<input type="checkbox"/> S'il y a plus d'un demandeur, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»			

Remplir impérativement la 2^{ème} page



BREVET D'INVENTION CERTIFICAT D'UTILITÉ

REQUÊTE EN DÉLIVRANCE
page 2/2

BR2

REMISE DES PIÈCES DATE 19 DEC 2003 LIEU 69 INPI LYON N° D'ENREGISTREMENT 0315068 NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI		Réservé à l'INPI
6 MANDATAIRE (s'il y a lieu)		
Nom		
Prénom		
Cabinet ou Société		CABINET LAVOIX
N° de pouvoir permanent et/ou de lien contractuel		
Adresse	Rue	62, rue de Bonnel
	Code postal et ville	69 14 18 LYON CEDEX 03
	Pays	FRANCE
N° de téléphone (facultatif)		04 78 60 52 84
N° de télécopie (facultatif)		04 78 60 90 89
Adresse électronique (facultatif)		
7 INVENTEUR (S)		
Les inventeurs sont nécessairement des personnes physiques		
Les demandeurs et les inventeurs sont les mêmes personnes		<input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non : Dans ce cas remplir le formulaire de Désignation d'inventeur(s)
8 RAPPORT DE RECHERCHE		
Uniquement pour une demande de brevet (y compris division et transformation)		
Établissement immédiat ou établissement différé		<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Paiement échelonné de la redevance (en deux versements)		Uniquement pour les personnes physiques effectuant elles-mêmes leur propre dépôt <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
9 RÉDUCTION DU TAUX DES REDEVANCES		
Uniquement pour les personnes physiques		
<input type="checkbox"/> Requête pour la première fois pour cette invention (joindre un avis de non-imposition) <input type="checkbox"/> Obtenue antérieurement à ce dépôt pour cette invention (joindre une copie de la décision d'admission à l'assistance gratuite ou indiquer sa référence) : AG		
10 SÉQUENCES DE NUCLEOTIDES ET/OU D'ACIDES AMINÉS		
<input type="checkbox"/> Cochez la case si la description contient une liste de séquences		
Le support électronique de données est joint <input type="checkbox"/> La déclaration de conformité de la liste de séquences sur support papier avec le support électronique de données est jointe <input type="checkbox"/>		
Si vous avez utilisé l'imprimé «Suite», indiquez le nombre de pages jointes		
11 SIGNATURE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE (Nom et qualité du signataire) CABINET LAVOIX Gérard MYON CPI N° 95-1003		VISA DE LA PRÉFECTURE OU DE L'INPI

L'invention a trait à un procédé et à un dispositif de commande des déplacements d'une partie mobile d'un robot multi-axes le long d'une trajectoire.

Dans le domaine de la commande des robots multi-axes, il est connu de commander un robot multi-axes grâce à des boucles d'asservissement de type PID (proportionnelle intégrale dérivée) en position, vitesse et courant, afin de faire évoluer la partie terminale d'un robot, qui peut porter un outil ou un préhenseur, sur une trajectoire de géométrie et de profil de vitesse déterminés. Il est également connu de commander un tel robot en diminuant la raideur d'asservissement sur chaque axe, afin de permettre une variation de la position du bras en fonction des efforts d'interaction entre les parties mobiles du robot et leur environnement. Il est en particulier connu, par exemple de US-A-5,742,138, de paramétrer la raideur d'un bras de robot multi-axes dans un système de coordonnées rectangulaires, de mesurer une erreur de position, de calculer un effort et de corriger la position de la partie mobile du robot afin d'obtenir une certaine souplesse de l'organe terminal. Une telle souplesse peut être utilisée pour réaliser des opérations de manipulation de pièces telle qu'un polissage, un ébavurage ou le déchargement d'une presse pour lesquels un effort de contact peut contrarier le mouvement programmé du robot.

Il est également connu de donner un effort de consigne dans un système de coordonnées rectangulaires afin de réaliser une opération à effort contrôlé le long d'une trajectoire, par exemple pour une opération d'ébavurage ou de polissage.

Dans les systèmes connus, on prévoit parfois que l'interface de programmation de trajectoire permette de spécifier des paramètres tels que la vitesse ou l'accélération de la partie mobile sur sa trajectoire, ces

paramètres déterminant la position de la partie terminale du bras du robot le long de sa trajectoire en fonction du temps.

Il est également connu de US-A-4,874,997 de contrôler de façon numérique un moteur brushless d'articulation de robot
5 par modulation de largeur d'impulsions.

Dans les systèmes connus, il n'est pas possible de programmer de façon aisée un robot multi-axes pour que la trajectoire de déplacement de sa partie terminale puisse être contrôlée en vitesse et accélération d'une part, et en effort
10 tangentiel à la trajectoire du point de contact de sa partie mobile avec son environnement d'autre part, tout en respectant des valeurs de vitesse et d'accélération compatibles avec la structure mécanique du robot.

C'est à ces inconvénients qu'entend plus
15 particulièrement remédier l'invention en proposant un procédé dans lequel les interactions avec l'environnement de la partie mobile d'un robot, notamment une pièce ou un outil porté par celui-ci, sont contrôlées avec précision.

Dans cet esprit, l'invention concerne un procédé de
20 commande des déplacements d'une partie mobile d'un robot multi-axes le long d'une trajectoire dans lequel sont des prévues des étapes consistant à :

- fournir à un générateur de trajectoire des instructions de mouvements incluant au moins des informations
25 relatives à la géométrie de la trajectoire et à des consignes d'effort ;

- calculer un signal dit d'effort extérieur représentant au moins une composante de l'effort exercé par la partie mobile sur son environnement ;

30 - fournir, à une fréquence d'échantillonnage prédéterminée, le signal d'effort extérieur au générateur de trajectoire ;

- calculer, au moyen du générateur de trajectoire et à une fréquence d'échantillonnage prédéterminée, des consignes

de mouvement de façon à minimiser l'écart entre la projection de l'effort extérieur sur la tangente à la trajectoire et la projection de la consigne sur cette tangente ; et

- fournir les consignes de mouvement à un moyen d'asservissement qui permet de mettre en mouvement au moins un axe du robot conformément à ces consignes.

L'asservissement en effort tangentiel permet donc de conserver la géométrie de la trajectoire, tout en adaptant la vitesse de la partie mobile sur cette trajectoire.

- 10 Selon des aspects avantageux, un procédé de commande des déplacements d'une partie mobile d'un robot multi-axes peut incorporer une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- Le signal d'effort extérieur est calculé à partir d'une information représentant le courant circulant dans au moins un actionneur du robot.

- Il est prévu une étape consistant à utiliser un modèle dynamique du robot lors du calcul du signal d'efforts extérieur.

- Il est prévu une étape consistant à fournir au générateur de trajectoire au moins une valeur limite de vitesse et/ou une valeur limite d'accélération pour prise en compte lors du calcul des consignes de mouvement, de telle sorte que ces consignes soient conformes à cette ou ces valeurs limites.

- 25 L'invention concerne également un dispositif permettant de mettre en œuvre un procédé décrit ci-dessus et, plus spécifiquement, un dispositif qui comprend :

- un générateur de trajectoire apte à calculer des consignes de mouvements en fonction d'instruction de mouvements incluant au moins des informations relatives à la géométrie de la trajectoire et à des consignes d'efforts et

- un estimateur d'effort apte à générer un signal d'effort extérieur représentant au moins une composante de l'effort exercée par la partie mobile sur son environnement

et à fournir ce signal au générateur de trajectoire, à une fréquence d'échantillonnage prédéterminée, alors que le générateur de trajectoire est apte à calculer les consignes de mouvements, à une fréquence d'échantillonnage prédéterminée, de façon à minimiser l'écart entre la projection de l'effort extérieur sur la tangente et la trajectoire et la projection de la consigne d'effort sur cette tangente, ces consignes de mouvement étant fournies à un moyen d'asservissement permettant de mettre en mouvement au moins un axe du robot.

De façon avantageuse, ce dispositif comprend un moyen interpréteur de programmes apte à exécuter des programmes qui comportent des instructions de mouvements permettant de spécifier au moins la géométrie de la trajectoire et des consignes d'efforts.

L'invention sera mieux comprise et d'autres avantages de celle-ci apparaîtront plus clairement à la lumière de la description qui va suivre d'un mode de réalisation d'un procédé conforme à son principe, donné uniquement à titre d'exemple et fait en référence aux dessins annexés dans lesquels :

- La figure 1 est une représentation schématique de principe d'un robot multi-axes en train de déplacer une fraise le long d'une trajectoire, grâce à un procédé conforme à l'invention.

- La figure 2 est une représentation schématique de principe de la répartition des efforts au niveau d'une partie mobile du robot de la figure 1.

- La figure 3 est un schéma-bloc de principe représentant le fonctionnement général de l'invention ;

- La figure 4 est un schéma-bloc de principe représentant le transfert des consignes de position au système d'asservissement correspondant pour chaque moteur ;

- La figure 5 est un schéma-bloc de principe représentant l'asservissement de chaque moteur ;

- La figure 6 est une représentation de la méthode utilisée pour estimer les efforts extérieurs et

5 - La figure 7 représente l'algorithme utilisé par le générateur de trajectoire pour générer les consignes de mouvements.

Le robot R représenté à la figure 1 est un robot multi-axes à six articulations. Il peut évoluer avec six degrés de
10 liberté. Le robot R peut être commandé en mode cartésien, auquel cas ses degrés de liberté peuvent être trois degrés de liberté en translation selon la direction de trois axes X, Y et Z et trois degrés de liberté en rotation R_x , R_y , et R_z autour des axes précités. Le robot R peut également être
15 commandé en mode articulaire, auquel cas ses degrés de liberté peuvent être six rotations R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 et R_6 autour de ses six axes d'articulation X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 et X_6 .

Ce robot est associé à une unité de commande U qui
contrôle son fonctionnement pendant les phases
20 d'apprentissage et d'utilisation.

Un boîtier B de commande manuelle peut également être utilisé pendant les phases d'apprentissage.

Dans l'exemple représenté, le robot R porte un outil O, tel qu'une fraise, qu'il convient de déplacer selon une
25 trajectoire T.

Comme il ressort plus particulièrement de la figure 2, on considère que l'outil O est déplacé par le robot R le long du bord B_1 d'une pièce à fraiser. La trajectoire T est globalement parallèle à ce bord. On note F l'effort exercé
30 par l'outil O sur le bord B_1 . On note F_T la composante de cet effort tangente à la trajectoire T et F_N la composante de cet effort normale à la trajectoire T.

Conformément à l'invention, on utilise la valeur de la composante F_T dans le procédé de commande des déplacements de l'outil O.

Dans la descriptif suivant F_{ext} est utilisé au sens large et représente le vecteur des couples articulaires du bras robot ou le torseur des effort extérieurs intégrant les efforts cartésiens F_x, F_y, F_z , et les couples cartésiens M_x, M_y, M_z .

Comme représenté à la figure 3 l'environnement de programmation 100 permet à l'utilisateur du système de programmer le robot de manière à ce qu'il réalise les opérations souhaitées. Ces opérations sont décrites par des programmes. L'environnement de programmation permet d'apprendre les positions successives que doit atteindre le robot, d'écrire les programmes décrivant l'enchaînement des mouvements, de mettre au point ces programmes, de démarrer leur exécution, de les arrêter, etc...

Pour exécuter les programmes, l'environnement de programmation fait appel à un interpréteur de programmes 200. Celui-ci exécute les programmes destinés à réaliser une tâche par le robot. Les programmes exécutés contiennent, entre autre, des instructions 300, dites instructions de mouvement. Elles décrivent les types de mouvements que doit faire le robot (ligne droite, cercle,... etc), ainsi que les différent paramètres les caractérisant (point d'arrivée, vitesse, effort,...).

Ces instructions de mouvement 300 sont transférées au générateur de trajectoire 400. Celui est chargé de leur exécution, c'est-à-dire qu'il doit générer régulièrement (typiquement toutes les 4 millisecondes), en fonction de leur type et de leurs paramètres, des consignes de mouvement 500. Ces consignes de mouvement 500 représentent la trajectoire que doit suivre le robot à chaque instant. Le robot industriel asservi 600 comprend un bras industriel à six axes

ainsi que son système d'asservissement. Le système d'asservissement est conçu de manière à piloter les six moteurs du robot (un pour chaque axe), de sorte que la trajectoire réelle du robot suive au mieux la trajectoire
 5' définie par les consignes de mouvement 500.

Dans certaines applications, l'organe terminal du robot industriel 600 interagit mécaniquement avec son environnement : par exemple, la pièce qu'il est en train de fraiser. L'estimateur d'effort extérieur 700 est un moyen
 10 d'obtenir un signal, dit effort extérieur 800, représentant la valeur et la direction des efforts exercés par le robot sur son environnement. Ce signal est renvoyé au générateur de trajectoire 400 en temps réel (typiquement toutes les 4 millisecondes). Ce dernier utilise ce retour d'information
 15 pour modifier les consignes de mouvement, de manière à réguler les efforts d'interactions.

L'environnement de programmation comporte un boîtier de commande qui permet de déplacer le robot dans un mode interactif, de manière à pouvoir apprendre les différentes
 20' positions que devra prendre le robot. Il sert aussi d'interface de programmation pour éditer et mettre au point les programmes. Le langage utilisé pour l'écriture de ces programmes est un langage textuel, mais d'autres types de langages (graphique par exemple) pourraient être utilisés
 25 dans le cadre de cette invention ...

Le langage utilisé contient des instructions courantes dans les langages de programmation de robot, qui permettent de spécifier différents types de mouvement, de contrôler leur vitesse et accélération ainsi que leur enchaînements.

30 On présente maintenant, à titre d'exemple, ici deux autres instructions relatives à l'invention.

L'instruction :

MOVEJF(position, outil, params, force)

spécifie que le robot doit déplacer l'outil qu'il porte définie par le paramètre « outil », depuis la position finale du mouvement précédent jusqu'à la position définie par le paramètre « position ». Le déplacement se fait en mode
5 articulaire, c'est à dire qu'il y a un rapport de proportionnalité constant entre les déplacements de chaque axe durant le mouvement. Le paramètre « params » spécifie les vitesses et accélérations à ne pas dépasser durant le mouvement. Il spécifie aussi si le mouvement doit être
10 enchaîné au mouvement suivant. Enfin, le paramètre « force » spécifie la valeur désirée de l'effort tangentiel à la trajectoire durant le mouvement. Dans la mesure où les limites de vitesse et d'accélération définies par « params » ne sont pas atteintes, le robot doit adapter son déplacement
15 le long de la trajectoire de manière à maintenir la valeur de l'effort tangentiel la plus proche possible de la valeur spécifiée par le paramètre « force ».

L'instruction :

MOVELF(position, outil, params, force)

20 est similaire. La seule différence est que le mouvement doit s'exécuter en ligne droite.

On peut imaginer facilement des instructions similaires, définissant des trajectoires circulaires, ou définies par des splines ou autres...

25 Il est important pour l'invention que ces instructions définissent, d'une part, la géométrie de la trajectoire que doit suivre le robot et, d'autre part, la valeur de l'effort tangentiel que doit exercer le robot lors de son déplacement.

L'interpréteur de programmes 200 est chargé d'exécuter
30 les programmes élaborés avec l'environnement de développement. Pour exécuter les instructions de mouvement, il vérifie la validité des paramètres spécifiés par l'utilisateur, puis transmet l'instruction de mouvement 300 au générateur de trajectoire 400. Les instruction de

mouvement 300 contiennent les informations issues des valeurs spécifiées dans le programme, à savoir :

- 310 Définition de la géométrie de la trajectoire : Un indicateur indique le type de trajectoire (articulaire ou ligne droite). Si le type est « articulaire », les coordonnées articulaires q_0 du point de départ et q_1 du point d'arrivée sont données. Si le type est « ligne droite », les coordonnées cartésiennes x_0 du point de départ et x_1 du point d'arrivée sont données.
- 320 consigne d'effort tangentiel : Il s'agit de la valeur désirée f_{des} de la norme de l'effort cartésien exercé par l'extrémité du robot sur son environnement.
- 330 Limite de vitesse : valeur limite v_{max} pour la norme de la vitesse cartésienne de l'extrémité du robot.
- 340 Limite d'accélération : valeur limite a_{max} pour la norme de l'accélération cartésienne de l'extrémité du robot.

Dans le mode de réalisation décrit ici, les commandes de mouvement 500 sont constituées par les positions angulaires q_{des} des 6 moteurs. Elles sont mise à jour par le générateur de trajectoire toutes les 4 millisecondes. Chacune des six consignes de position q_{des1} , q_{des2} ,... q_{des6} , est transférée au système d'asservissement correspondant pour chaque moteur 601, 602,... 606 comme représenté à la figure 4.

Chaque moteur est équipé d'un capteur de position et de vitesse. L'asservissement sur chaque moteur est de type proportionnel-intégral-dérivé (PID). A la figure 5, $q_{des,j}$ est la consigne de position sur l'axe j , $q_{mes,j}$ est la position mesurée, $K_{p,j}$, $K_{i,j}$ et $K_{d,j}$ sont les gains respectifs du PID, $I_{des,j}$ est la consigne de courant, $I_{mes,j}$ est le courant mesuré, et p est la variable de Laplace.

D'autres techniques d'asservissement en position peuvent aussi être employées dans le cadre de la présente invention. Par exemple, l'asservissement peut être réalisé par la

technique dite de découplage et linéarisation. Dans ce cas, l'asservissement n'est plus réalisé axe par axe. Dans notre exemple, les consignes de mouvement 500 sont les position angulaires désirées pour chaque moteur. On peut aussi
5 utiliser la position et la vitesse désirées de l'organe terminal, exprimées dans des coordonnées cartésiennes. Les consignes de mouvement peuvent encore être des incréments de position successifs, ou bien les vitesses désirées sur chaque moteur à chaque instant. Le point important pour l'invention
10 est que le générateur de trajectoire 400 calcule en temps réel la trajectoire que doit suivre le robot et qu'un système d'asservissement fait en sorte que le robot suive au mieux cette trajectoire.

De nombreux moyens sont possibles pour estimer l'effort
15 exercé par le robot sur l'extérieur dans le cadre de la présente invention. Le plus simple consiste à placer un capteur d'efforts à l'extrémité du robot. Dans ce cas, l'effort extérieur 800 est exprimé dans des coordonnées cartésiennes. On peut aussi utiliser des capteurs d'efforts
20 ou de couples placé à différents endroits sur le robot.

Dans le mode de réalisation proposé et représenté à la figure 6, on présente une solution qui permet d'estimer l'effort extérieur en utilisant des variables de l'asservissement de position.

25 La méthode utilisée requière une valeur 701 représentant le courant I circulant dans chaque moteur. Dans notre cas, celle-ci est égale à la mesure de courant Imes utilisée dans le système d'asservissement.

$$I = \text{Imes} = [\text{Imes},1 \quad \text{Imes},2 \quad \dots \quad \text{Imes},6]$$

30 On pourrait aussi bien utiliser la commande de courant, soit

$$I = \text{Ides} = [\text{Ides},1 \quad \text{Ides},2 \quad \dots \quad \text{Ides},6]$$

ou toute autre variable, mesurée ou calculée, représentant les courants circulants dans les moteurs.

Les moteurs utilisés sont des moteurs brushless. Le modèle 702 le plus simple pour ce type de moteur consiste à considérer que le couple délivré C_m 703 est proportionnel au courant traversant le moteur, soit :

$$5 \quad C_m = K_t \cdot I$$

Dans cette expression, I et C_m sont des vecteurs contenant les informations relatives à chaque axe et K_t est une matrice diagonale. Des modèles plus complexes pourraient être utilisés en 702.

10 D'autre part, la méthode utilisée requière des signaux représentant les mouvements du robot 711, par exemple les positions, vitesses, accélérations de chaque moteur représentés respectivement par les vecteurs q , dq/dt et d^2q/dt^2 . Dans notre cas, ces valeurs sont déduites des mesures
15 capteurs utilisées par le système d'asservissement et leur dérivées.

$$q = q_{mes}$$

$$dq/dt = d(q_{mes})/dt$$

$$d^2q/dt^2 = d^2(q_{mes})/dt^2$$

20 On pourrait tout aussi utiliser les consignes de positions et leur dérivées : q_{des} , $d(q_{des})/dt$, $d^2(q_{des})/dt^2$.

A partir des ces informations, et d'un modèle dynamique du bras 712 établi, par exemple, avec les équations de Newton-Euler, on calcule un vecteur C_d représentant les
25 couples qu'exercerait en théorie chaque moteur du robot, s'il n'exerçait aucun effort sur l'extérieur 713.

On en déduit, par différence en 720, un vecteur C_{ext} 800 qui est une estimation des couples moteurs correspondant aux efforts exercés par le robot sur son environnement 800 :

$$30 \quad C_{ext} = C_m - C_d$$

La figure 7 montre comment l'algorithme utilisé par le générateur de trajectoire peut être décomposé en quatre parties :

A partir de la consigne d'effort tangentiel 310, de l'effort extérieur 800 et de la géométrie de la courbe 320, on calcule en 410 une variable d'erreur scalaire 420. Les limitations de vitesse 330 et d'accélération 340 sont projetées en 430 sur la courbe 320. A partir des limites de vitesse et d'accélération projetées 470 ainsi que de la variable d'erreur 420, un régulateur 430 calcule le mouvement désiré le long de la courbe 440. Les consignes de mouvement du robot 500 sont alors calculées en 450 à partir de la définition de la géométrie de la courbe 320 et du mouvement le long de la courbe 440.

Chacune de ces quatre parties est décrite dans ce qui suit.

15 A - Calcul de la variable d'erreur (410-420) : cas d'un mouvement en ligne droite

Le calcul de la variable d'erreur 420 est présenté ici dans le cas d'un mouvement en ligne droite. Les calculs qui suivent consistent à calculer la projection sur la courbe 320 de la différence entre la consigne d'effort 310 et l'effort extérieur 800.

Lors d'un mouvement en ligne droite, la position cartésienne x du robot (vecteur) peut être paramétrée de la manière suivante :

$$25 \quad x = x_0 + s \cdot (x_1 - x_0)$$

Où x_0 est la position cartésienne de départ du mouvement, x_1 est la position cartésienne d'arrivée, et s est un paramètre scalaire compris entre 0 et 1. On peut ré-écrire l'équation précédente sous la forme

$$30 \quad x = f(s) \quad (\text{Eq. 1})$$

En dérivant cette équation, on a :

$$v = dx/dt = df/ds \cdot ds/dt \quad (\text{Eq. 2})$$

Dans cette expression df/ds est un vecteur cartésien tangent à la courbe. Le vecteur cartésien

$$u = (df/ds) / || df/ds ||$$

est unitaire et tangent à la courbe.

Dans notre exemple, la consigne d'effort 300 est la norme de l'effort tangent cartésien. Le vecteur d'effort cartésien désiré vaut donc :

$$F_{des} = f_{des} \cdot u \quad (Eq. 3)$$

L'effort extérieur 800 est donné par le vecteur des couples articulaires C_{ext} . On peut transformer cette valeur en coordonnées cartésiennes en utilisant la formule suivante :

$$F_{ext} = J^{-t} \cdot C_{ext} \quad (Eq. 4)$$

où J^{-t} est l'inverse de la transposée de la matrice jacobienne du robot.

La variable de commande choisie 420, notée ϵ , est la différence entre l'effort tangent désiré et l'effort extérieur, projeté sur la tangente à la trajectoire, soit :

$$\epsilon = u^t \cdot (F_{des} - F_{ext})$$

Ce calcul reste valide quel que soit la fonction f utilisée (cercle, spline, ou autre...), dans la mesure où elle est différentiable, ce qui signifie qu'on peut définir sa tangente en tout point.

Ce calcul a été conduit dans le cas particulier où la consigne d'effort 300 est la norme d'un vecteur d'effort cartésien et l'effort extérieur 800 est donné en coordonnées articulaires. En utilisant les formules de changement de coordonnées adéquates, par exemple à la place des équations Eq. 3 et Eq. 4, on peut traiter les cas où les ces information sont données dans n'importe quel système de coordonnées.

30 B - Calcul de la variable d'erreur (410-420) : cas d'un mouvement articulaire

Dans le cas d'un mouvement articulaire, la position articulaire q du robot peut être paramétrée de la manière suivante :

$$q = q_0 + s \cdot (q_1 - q_0)$$

où q_0 est la position articulaire de départ du mouvement, q_1 est la position articulaire d'arrivée, et s est un paramètre scalaire compris entre 0 et 1. On peut ré-écrire l'équation
5 précédente sous la forme

$$q = g(s)$$

La position cartésienne correspondante est

$$x = k(q(s))$$

où k est le modèle géométrique direct du robot.

10 Le mouvement articulaire peut donc se traiter comme le mouvement cartésien, en choisissant la fonction f telle que :

$$f(s) = k(q(s))$$

*C - Projection des limites de vitesse et
15 d'accélération le long de la courbe 460*

Dans notre exemple, les limites de vitesse sont données en coordonnées cartésiennes. Autrement dit, on souhaite que la norme de la vitesse v du robot soit inférieure à une vitesse donnée v_{\max} , et la norme de l'accélération
20 cartésienne dv/dt soit inférieure à une accélération donnée a_{\max} .

On définit les valeurs suivantes :

$$(ds/dt)_{\max} = \min (v_{\max} / || df/ds || ; c \cdot \text{sqrt}(a_{\max} / || df/ds ||)) \quad (\text{Eq. 5})$$

$$(d^2s/dt^2)_{\max} = (a_{\max} - || df/ds || \cdot (ds/dt)_{\max}) / || d^2f/ds^2 || \quad (\text{Eq. 6})$$

25 où

c est une constante telle que $0 < c < 1$

$\text{sqrt}()$ dénote la fonction racine carrée

Supposons qu'on ait :

$$| ds/dt | \leq (ds/dt)_{\max}$$

30 $| d^2s/dt^2 | \leq (d^2s/dt^2)_{\max}$

Alors, d'après l'équation Eq. 2, on a :

$$|| v || = || df/ds \cdot ds/dt || = || df/ds || \cdot |ds/dt| \leq || df/ds || \cdot (ds/dt)_{\max}$$

Et donc, d'après l'équation Eq. 5, on a :

$$|| v || \leq v_{\max}$$

D'autre part, en dérivant l'équation Eq. 2, on a

$$a = df/ds \cdot d^2s/dt^2 + d^2f/ds^2 \cdot (ds/dt)^2$$

donc

$$\begin{aligned} || a || &= || df/ds \cdot d^2s/dt^2 + d^2f/ds^2 \cdot (ds/dt)^2 || \\ 5 \quad &\leq || df/ds || \cdot | d^2s/dt^2 | + || d^2f/ds^2 || \cdot | ds/dt |^2 \\ &\leq || df/ds || \cdot (d^2s/dt^2)_{\max} + || d^2f/ds^2 || \cdot (ds/dt)_{\max}^2 \end{aligned}$$

En utilisant les définitions des équations Eq. 5 et Eq. 6, on obtient :

$$|| a || \leq a_{\max}$$

10 Les valeurs $(ds/dt)_{\max}$ et $(d^2s/dt^2)_{\max}$ définissent donc des contraintes sur les dérivées de s , qui font en sorte que les limites de vitesse et d'accélération cartésiennes sont vérifiées. On peut donc considérer que ce sont les projections des limites de vitesse et d'accélération
15 cartésienne dans les coordonnées de s .

De manière similaire, on pourrait avoir des limitations de vitesse et/ou d'accélération articulaire en utilisant la fonction $h(s) = k^{-1}(f(s))$ à la place de la fonction f dans les calculs précédents.

20

D - Régulateur (430)

Le régulateur 430 a pour rôle de générer des mouvements le long de la courbe 440, de manière à maintenir la variable d'erreur la plus proche de zéro 420.

25

Le régulateur utilisé est de type intégral. Un régulateur intégral « classique » peut s'exprimer sous la forme suivante :

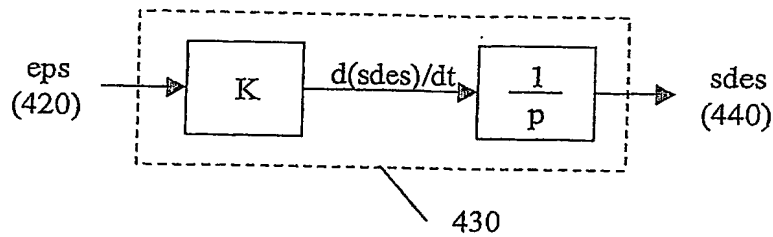
$$d(sdes)/dt = K \cdot \epsilon$$

$$sdes = \int d(sdes)/dt \cdot dt$$

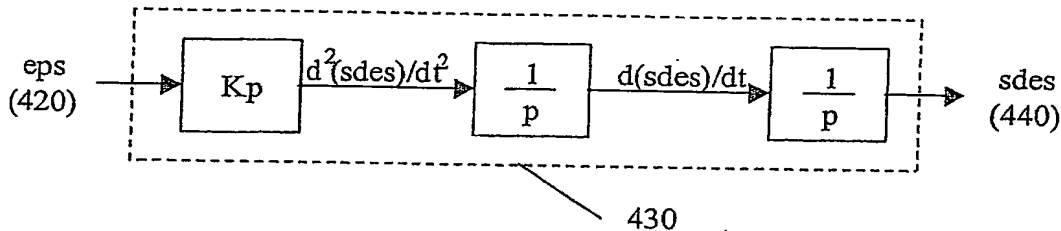
30

où $sdes$ est la position désirée du robot le long de la courbe, exprimée dans les unités du paramètre s de l'équation Eq. 1, et K une constante. Ceci est représenté sur le schéma-block suivant, où p désigne la variable de Laplace.

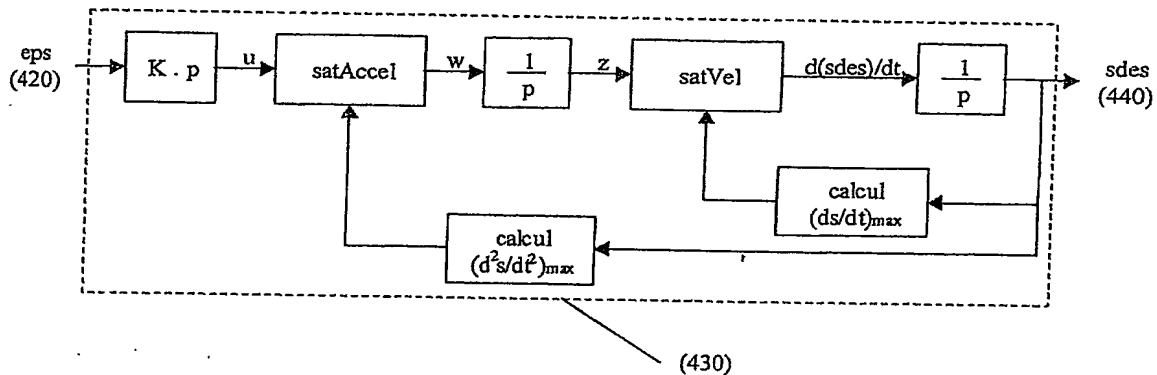
16



Ce schéma est équivalent à :



- 5 Pour intégrer les limitations de vitesse et d'accélération, on modifie le schéma de la manière suivante.



- 10 Les blocs « calcul $(ds/dt)_{\text{max}}$ » et « calcul $(d^2s/dt^2)_{\text{max}}$ » calculent les limites de vitesse et d'accélération projetées, en fonction de sdes , selon les équations Eq. 5 et Eq. 6 (df/ds et d^2f/ds^2 sont évaluées pour $s = \text{sdes}$). Le bloc satVel sature la vitesse z en entrée en fonction de $(ds/dt)_{\text{max}}$. Autrement dit, on a :

$$15 \quad d(\text{sdes})/dt = \begin{cases} (ds/dt)_{\text{max}} & \text{si } z > (ds/dt)_{\text{max}} \\ z & \text{si } |z| \leq (ds/dt)_{\text{max}} \\ -(ds/dt)_{\text{max}} & \text{si } z < -(ds/dt)_{\text{max}} \end{cases}$$

De même, satAccel sature l'accélération u en fonction de $(d^2s/dt^2)_{\max}$, soit :

$$5 \quad w = \begin{cases} (d^2s/dt^2)_{\max} & \text{si } u > (d^2s/dt^2)_{\max} \\ u & \text{si } |u| \leq (d^2s/dt^2)_{\max} \\ - (d^2s/dt^2)_{\max} & \text{si } u < - (d^2s/dt^2)_{\max} \end{cases}$$

Dans tous les cas, ce schéma assure que :

$$|d(sdes)/dt| < (ds/dt)_{\max}$$

10 ce qui garantit que la norme de la vitesse cartésienne désirée le long de la trajectoire est inférieure à v_{\max} .

Lorsque la vitesse maximale n'est pas atteinte, on a

$$z = d(sdes)/dt$$

15 donc

$$w = d^2(sdes)/dt^2$$

alors,

$$|d^2(sdes)/dt^2| < (d^2s/dt^2)_{\max}$$

20 ce qui garantit que la norme de l'accélération cartésienne est inférieure à a_{\max} .

Dans un cadre général, l'algorithme présenté assure que la limite de vitesse cartésienne est toujours respectée et que la limite d'accélération est respectée dans la mesure où la vitesse cartésienne maximale n'est pas atteinte. Dans le cas de la ligne droite, lorsque la limite de vitesse est atteinte, l'accélération est nulle, donc la limite d'accélération est respectée.

E - Calcul (430) des consignes de mouvement 500

30 Dans notre cas, les consignes de mouvement 500 sont les coordonnées articulaires du robot q_{des} . A partir de la position désirée le long de la courbe s_{des} , on peut calculer la consigne de position cartésienne correspondante, grâce à l'équation paramétrique de la courbe Eq. 1.

$$x_{des} = f(s_{des})$$

Ensuite, on trouve les coordonnées articulaires grâce au modèle géométrique inverse du robot, noté k^{-1} .

$$q_{des} = k^{-1}(x_{des})$$

- 5 Si les consignes de mouvement étaient des vitesses, on pourrait utiliser les changement de coordonnées correspondant sur les vitesses (Equation Eq. 2 et inverse de la matrice jacobienne du robot).

REVENDEICATIONS

1. Procédé de commande des déplacements d'une partie
5 mobile d'un robot multi-axes le long d'une trajectoire, caractérisé en ce qu'il comprend des étapes consistant à :

- fournir à un générateur de trajectoire (400) des instructions de mouvement (300) incluant au moins des informations relatives à la géométrie de la trajectoire (320)
10 et à des consignes d'effort (310) ;

- calculer un signal (800) dit d'effort extérieur représentant au moins une composante de l'effort (F) exercé par ladite partie mobile (0) sur son environnement ;

- fournir, à une fréquence d'échantillonnage
15 prédéterminée, ledit signal d'effort extérieur (800) audit générateur de trajectoire (400) ;

- calculer, au moyen dudit générateur de trajectoire (400) et à une fréquence d'échantillonnage prédéterminée, des consignes de mouvement (500) de façon à minimiser l'écart
20 entre la projection (F_T) de l'effort extérieur sur la tangente (T) à la trajectoire et la projection de la consigne sur ladite tangente et

- fournir lesdites consignes de mouvement (500) à un moyen d'asservissement (601-606) qui permet de mettre en
25 mouvement au moins un axe dudit robot (600) conformément auxdites consignes de mouvement (500).

2. Procédé selon la revendications 1, caractérisé en ce que ledit signal d'effort extérieur (800) est calculé à partir d'une information représentant le courant circulant
30 dans au moins un actionneur (601-606) dudit robot (600).

3. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend une étape consistant à utiliser un modèle dynamique (712) dudit robot (600) lors du calcul dudit signal d'effort extérieur (800).

4. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend une étape consistant à fournir audit générateur de trajectoire (400) au moins une valeur limite de vitesse (330) et/ou une valeur limite d'accélération (340) pour prise en compte lors du calcul desdites consignes de mouvement (500), de telle sorte que lesdites consignes soient conforme à ladite ou auxdites valeurs limites.

5. Dispositif de commande des déplacements d'une partie mobile d'un robot multiaxes le long d'une trajectoire, caractérisé en ce qu'il comprend :

- un générateur de trajectoire (400) apte à calculer des consignes de mouvement (500) en fonction d'instructions de mouvements (300) incluant au moins des informations relatives à la géométrie de la trajectoire (320) et à des consignes d'effort (310) et

- un estimateur d'effort (700) apte à générer un signal d'effort extérieur (800) représentant au moins une composante de l'effort (F) exercé par ladite partie mobile (O) sur son environnement et à fournir ledit signal audit générateur de trajectoire, à une fréquence d'échantillonnage prédéterminée, alors que ledit générateur de trajectoire est apte à calculer lesdites consignes de mouvement (500), à une fréquence d'échantillonnage prédéterminée, de façon à minimiser l'écart entre la projection (F_T) de l'effort extérieur sur la tangente (T) à la trajectoire et la projection de la consigne d'effort sur ladite tangente, lesdites consignes de mouvement (500) étant fournies à un moyen d'asservissement (601-606) permettant de mettre en mouvement au moins un axe dudit robot (600).

6. Dispositif selon la revendication 5, caractérisé en ce qu'il comprend un moyen interpréteur de programme (200) apte à exécuter des programmes qui comportent des instructions de mouvement (300) permettant de spécifier au

moins la géométrie de la trajectoire (320) et des consignes d'effort (310).

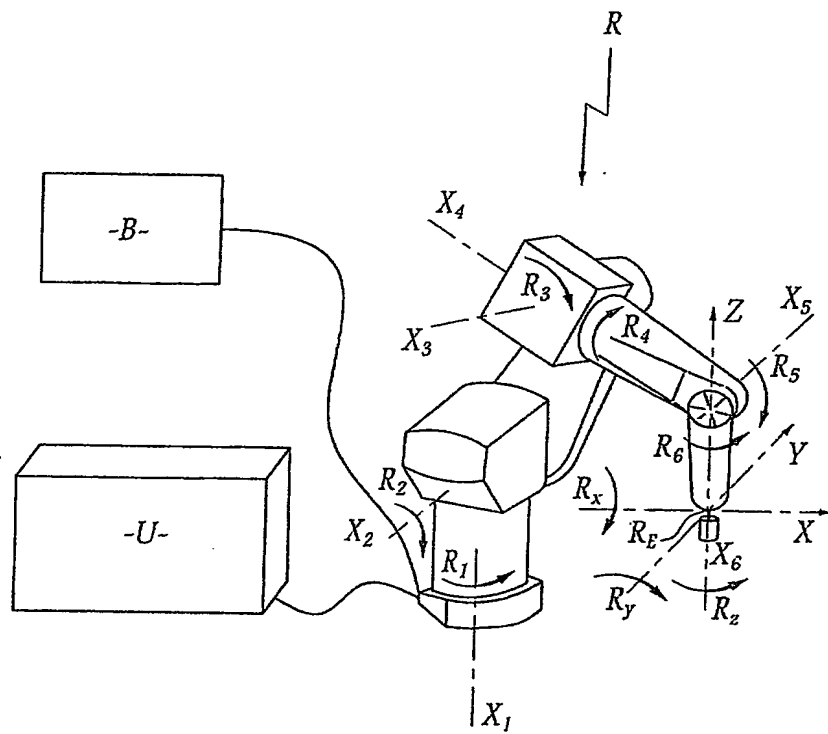


Fig. 1

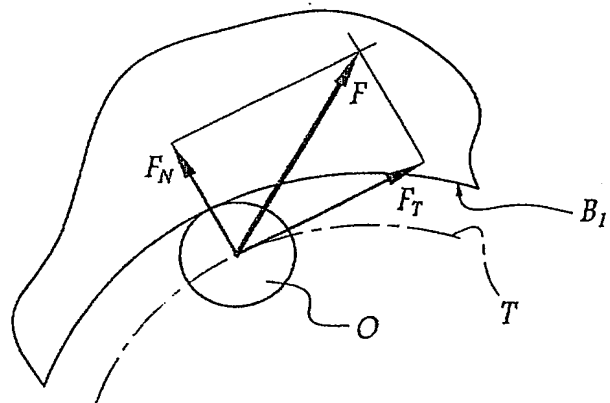
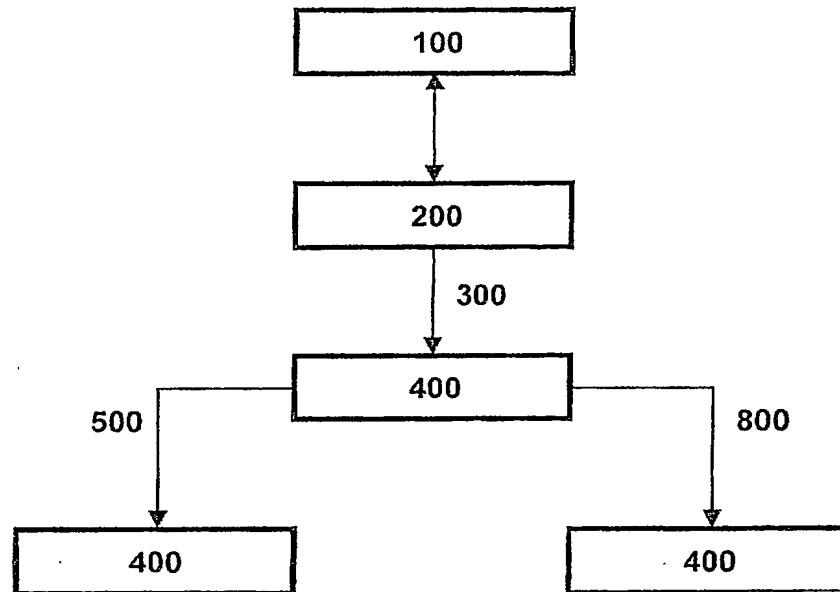
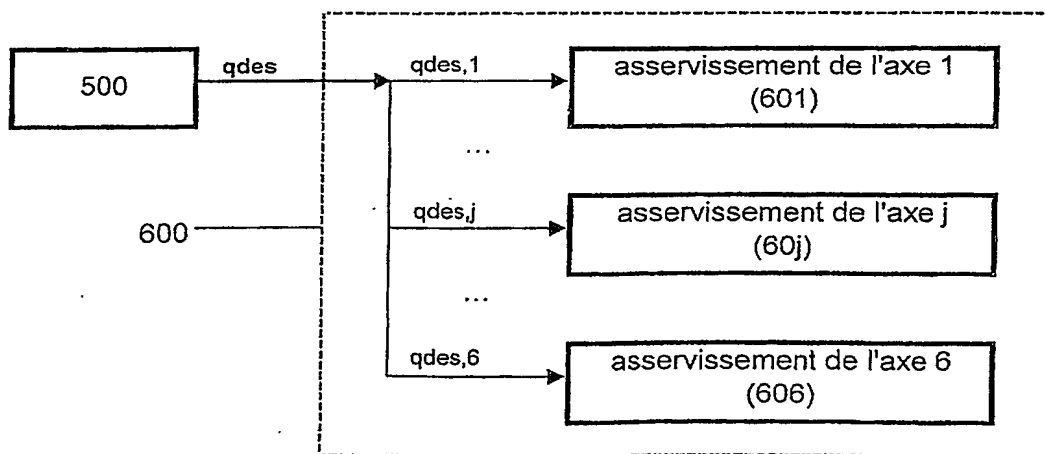


Fig. 2

*Fig.3**Fig.4*

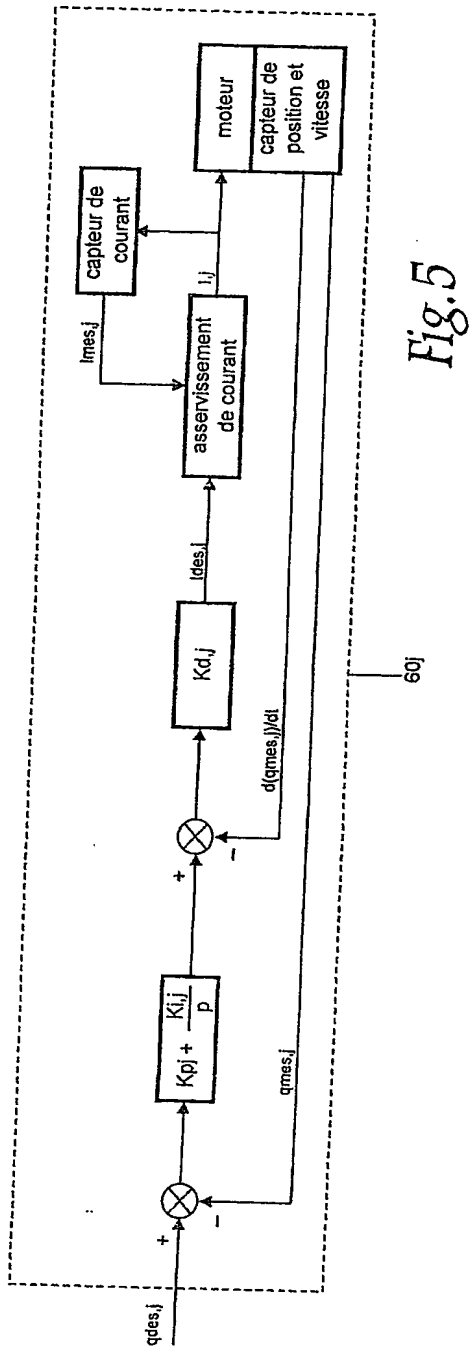


Fig. 5

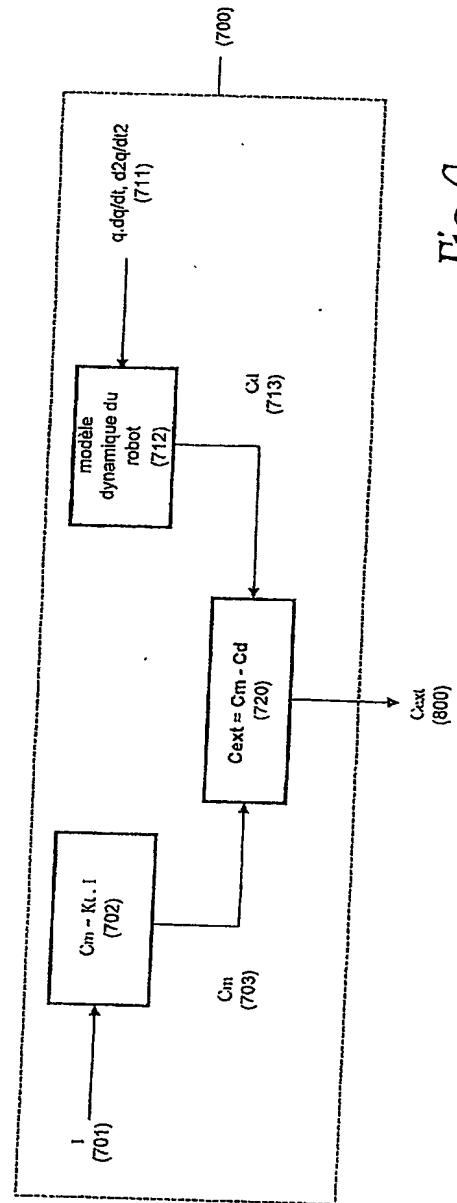


Fig. 6

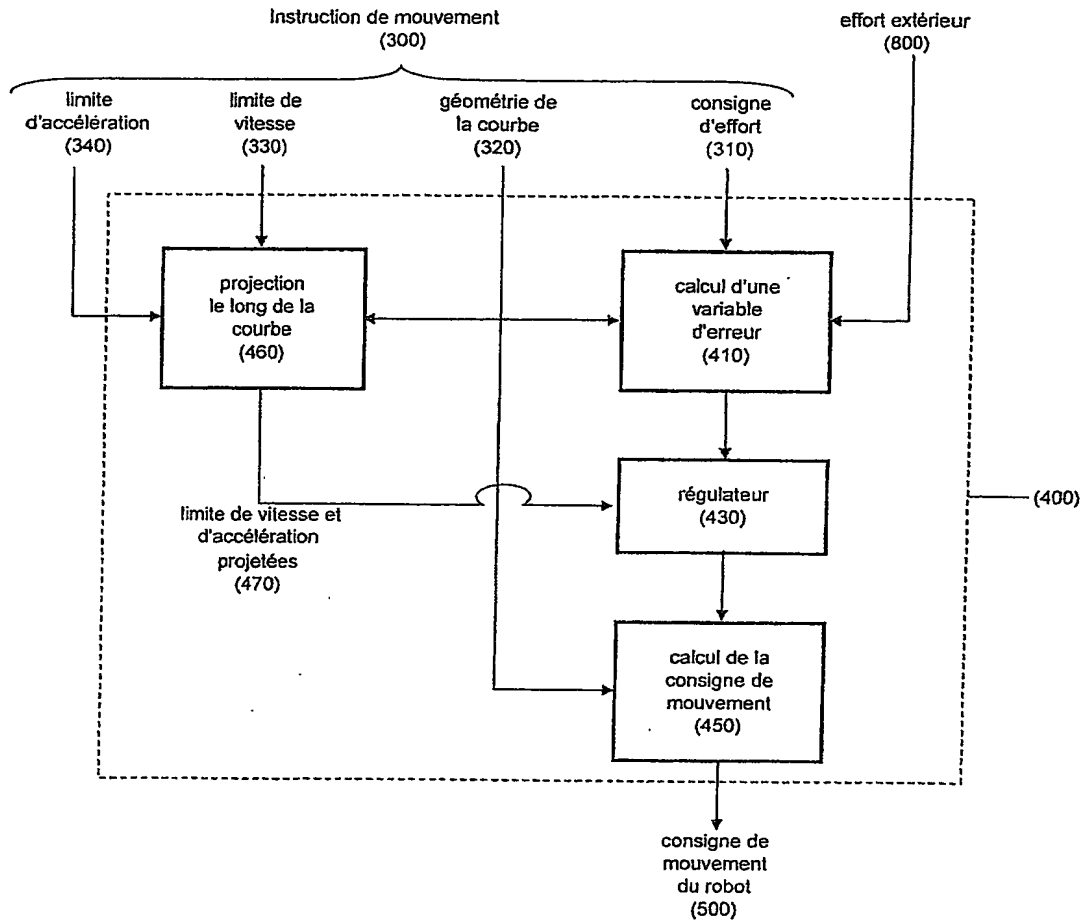


Fig. 7



BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITÉ

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI



N° 11235*03

DÉPARTEMENT DES BREVETS

26 bis, rue de Saint Pétersbourg
75800 Paris Cedex 08

Téléphone : 33 (1) 53 04 53 04 Télécopie : 33 (1) 42 94 86 54

DÉSIGNATION D'INVENTEUR(S) Page N° 1../1..

(À fournir dans le cas où les demandeurs et les inventeurs ne sont pas les mêmes personnes)



Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 113 @ W / 270601

Vos références pour ce dossier (facultatif)		BFF 03L0031
N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL		03-11068
TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum)		
PROCÉDE ET DISPOSITIF DE COMMANDE DES DEPLACEMENTS D'UNE PARTIE MOBILE D'UN ROBOT MULTI-AXES		
LE(S) DEMANDEUR(S) :		
STAUBLI FAVERGES		
DESIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S) :		
1	Nom	JOLY
	Prénoms	Luc
Adresse	Rue	337, route de Vesonne
	Code postal et ville	17 14 21 10 FAVERGES
Société d'appartenance (facultatif)		
2	Nom	
	Prénoms	
Adresse	Rue	
	Code postal et ville	
Société d'appartenance (facultatif)		
3	Nom	
	Prénoms	
Adresse	Rue	
	Code postal et ville	
Société d'appartenance (facultatif)		
S'il y a plus de trois inventeurs, utilisez plusieurs formulaires. Indiquez en haut à droite le N° de la page suivi du nombre de pages.		
DATE ET SIGNATURE(S) DU (DES) DEMANDEUR(S) OU DU MANDATAIRE (Nom et qualité du signataire)		
19 décembre 2003 CABINET LAVOIX Gérard MYON CPI N° 95-1003		

This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning Operations and is not part of the Official Record.

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

☒ **BLACK BORDERS**

☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**

☐ **FADED TEXT OR DRAWING**

☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**

☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**

☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**

☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**

☒ **LINE(S) OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**

☒ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**

☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.